

센서 융합 기반의 배추 수확기 예취부 3 축 자세 제어

Three-axis Attitude Control of Chinese Cabbage Harvester Cutting Device Based on Sensor Fusion

박 용 현¹, 전 종 표², 손 형 일^{3,*}
(Yonghyun Park¹, Jongpyo Jun^{2,3}, and Hyoung Il Son^{2,3,*})

¹Department of Biosystems Engineering, Gyeongsang National University

²Department of Rural and Biosystems Engineering, Chonnam National University

³Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Chonnam National University

Abstract: In Korea, Chinese cabbage harvesting is insufficiently mechanized and automated, and this task is typically carried out using manual labor. Thus, research on Chinese cabbage harvesters is required. However, the terrain in cabbage fields is generally rough and comprises many obstacles. Consequently, problems such as overcutting, missed cutting, and side cutting occur while cutting cabbages using a cabbage harvester. Therefore, it is necessary to study the cutting mechanism of the harvester to perform accurate cutting, considering the terrain in the fields. To this end, a three-axis attitude control mechanism was designed in this study; this mechanism controls the cutting device of the Korean cabbage harvester with three cylinders. In addition, an accelerometer, a gyro sensor, and a rotary encoder were designed for sensor fusion. The cylinders were controlled such that the measured roll (ϕ) and pitch (θ) were level with the ground. In addition, the angle of the guide in the cutting device (θ_e), driven by grounding to the ground, was calibrated using the height data. The cylinder in the sliding (x) axis was controlled to maintain the target height. Further, a proportional-integral-derivative controller was integrated to reduce overshoot and improve stability. To assess the performance of the algorithm, a 2:1 scaled-down model of the cutting device of the Korean cabbage harvester was produced, and the attitude control mechanism was installed on its driving platform and tested. Attitude measurement was performed using a motion capture device (OptiTrack). For quantitative evaluation, data with and without the attitude control system were compared by estimating their root mean square error (RMSE). The RMSE values for the level and height were 0.89° and 2.23 cm, respectively, for attitude control with the posture control system; however, those for attitude control without the posture control system were 2.15° and 4.05 cm, respectively. In addition, improvements of 58% in the level control and 45% in the height control were observed. In further investigations, better results can be obtained using the harvester if the changes in the angle and height are higher than those obtained in this experimental environment.

Keywords: chinese cabbage harvester, sensor fusion, Kalman Filter, PID control, attitude control

1. 서론

배추는 한국의 주요 음식 중 하나인 김치의 주재료로써 많은 소비와 높은 생산량을 기록하는 채소이다. 하지만 높은 소비에 비해 배추 수확 기계화는 매우 낮으며 인력을 통해 거의 모든 작업 진행하고 있고 그 중 가장 많은 노력과 시간이 요구되는 배추 수확 과정의 기계화 및 자동화를 위한 연구가 필요하다. 현재 국내외에 배추와 종이 비슷한 양배추 수확기의 개발은 많이 이루어지고 상용화까지 진행되었다. 양배추 수확기와 유사한 형태로 배추 수확기 개발 연구가 진행되었으며, 보행형 및 트랙터 견인 등의 형태로도 개발 연구가 진행되었다[1-3]. 그러나 줄기와 뿌리가 품질을 결정하는 결구부 바깥에 있어 비교적 줄기 절단이 쉬운 양배추와 달리, 배추의 뿌리, 줄기는 결구부 내부에 있는 기하학적인 형태로 인해 수확이 어렵다. 그리고 지역별 재배양식이 다르고 동일 포장내에서도 심도 차이 등으로 인해 국내외로 배추

수확기 연구 개발과 상용화에 어려움을 겪고 있다. 배추 수확기는 기체의 기울어짐에 따라 예취부의 수평 및 절단 높이가 일정하게 유지되지 못하여 배추의 절단이 정확히 이루어지지 않아 뿌리가 남아 있는 미 절단, 필요이상으로 절단한 과 절단, 그리고 배추의 절단면이 사선으로 된 측면 절단 등의 문제가 발생한다. 또, 한국의 배추 밭 대부분 경사가 있는 노지에서 재배를 하고 있기 때문에 경사를 대응하면서 정확한 절단 과정을 수행할 수 있어야 하므로 이러한 문제점을 해결하고 예취부의 절단 자세를 유지할 수 있는 배추 수확기의 연구가 필요하다.

자세제어에 대한 연구는 자동차, 드론, 로봇, 위성의 정확한 모션을 각종 센서를 통하여 측정하고 필요한 자세로 정확하게 제어할 필요가 있기 때문에 두 가지 이상의 센서들의 장점을 칼만 필터 등으로 융합하는 방법들이 다방면으로 연구되고 있으며[4-9], 현대 통계학, 신호처리 뿐만 아니라 제어 분야에 널리 사용되고 있다[9,10]. 하지만 농기계 특히, 수확

* Corresponding Author

Manuscript received December 2, 2020; revised December 29, 2020; accepted February 2, 2021

박용현: 경상대학교 바이오시스템공학과 대학원생(dk03378@nate.com, ORCID[®] 0000-0001-6085-5957)

전종표: 전남대학교 지역·바이오시스템공학과, IT-Bio 융합시스템 전공 대학원생(jundaek@gmail.com, ORCID[®] 0000-0001-8904-4234)

손형일: 전남대학교 지역·바이오시스템공학과, IT-Bio 융합시스템 전공 교수(hison@jnu.ac.kr, ORCID[®] 0000-0002-7249-907X)

※ 본 논문은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농식품기술융합창의인재양성사업의 지원을 받아 연구되었음(716001-7).

과정 부분에 적용된 연구와 기법들은 부족하고 적용된 사례가 많지 않으며, 자세 제어가 적용되어 있는 부분은 거의 주행 플랫폼, 방제 드론에 대한 연구에 치중되고 있다. 농업기계 중 자세를 제어하여 수평을 유지하는 장치는 연구 개발되어 있으나 기체를 수평으로 유지하는 기능이 목적이며, 배추와 같은 작물은 정확한 자세제어가 요구되기 때문에 본 문제에 대한 연구가 필요하다. 그리고 밭의 특성상, 농업 기계에 먼지, 진흙, 물, 작물의 겉잎 등으로부터 노출되어 레이저, 초음파 등 간접적인 센서사용이 불리하다. 그래서 직접적인 센서를 필요에 맞게 부착하여 상태를 출력하는 메커니즘 연구도 진행되어야 한다.

본 논문에서는 정확한 절단을 요구하는 배추 수확기 예취부의 자세를 제어하는 예취부 3축 자세제어 메커니즘을 제안하였다. 수확기의 예취부 자세를 단독으로 제어해 노지의 경사에 대응하도록 하여, 다른 플랫폼에도 설치해 사용할 수 있게 범용성을 높였다. 본 논문에서 제시한 메커니즘은 국내 외로 적용된 사례가 없다. 그래서 기초연구로 농업분야에 한정적으로 연구 진행되었던 칼만 필터를 이용해 예취부 자세 추정에 필요한 가속도계와 자이로 센서, 로터리 엔코더를 센서 융합한 알고리즘을 고안하였다. 또한, 농업 특성상 노면이 고르지 못한 노지를 주행하여 수확 작업을 진행하는 경우가 많기 때문에 노지 경사나 장애물에 대한 급격한 자세 변화에 대응하고 오버슈트를 줄일 수 있도록 PID 제어도 알고리즘에 통합하여 안정적인 자세 제어를 할 수 있도록 하였다. 또한, 제한한 자세 제어 알고리즘을 검증하기 위해 배추 수확기 예취부를 2:1 축소한 모델을 제작하였고 모션 캡처 장비를 이용하여 자세제어 유무에 따른 예취부 자세를 확인하여 비교 평가하였다.

II. 배추 수확기 예취부 자세 제어 시스템

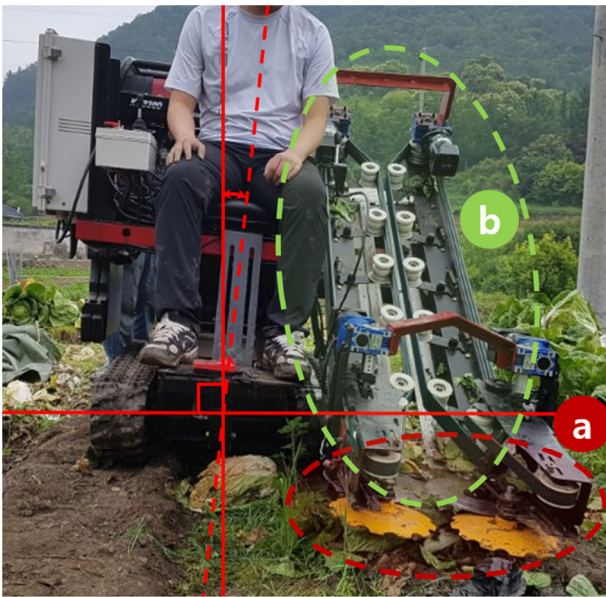


그림 1. 배추 수확기 기체 기울기 문제;

(a) 절단 칼날 및 가이드, (b) 예취부.

Fig. 1. Cabbage Harvest Body Slope Problem;

(a) Cutting Blade and Guide, (b) Cutting Device.

1. 기존 배추 수확기 문제점

배추는 양배추와 달리 줄기가 절구부 내부에 있는 기하학적인 형태를 가지고 있어 정확한 절단이 이루어지지 않으면 절구부 손상으로 상품성이 저하된다. 정확한 절단을 방해하는 문제는 그림 1과 같이 수확기의 기체 기울어짐으로 인해 그림 2와 같이 뿌리가 남아있는 미 절단(그림 2(b) 참고), 필요이상으로 절단된 과 절단(그림 2(c) 참고), 배추의 절단면이 사선으로 된 측면 절단되어 상태가 불량한 측면 절단(그림 2(d) 참고)과 같은 현상이 발생하였다. 또 국내의 배추 밭 대부분 경사진 노지에서 배추 채배가 이루어지고 있어 기체 기울어짐 문제가 더욱 심하기 때문에 정확한 배추 절단을 위해서 두둑과 장애물, 그리고 배추 밭의 경사를 대응할 수 있는 배추 수확기를 개발하여야 한다.

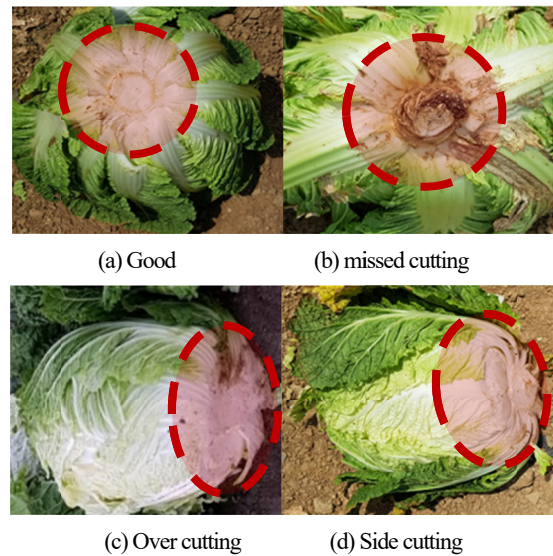


그림 2. 배추 절단 상태.

Fig. 2. Cabbage Cutting State.

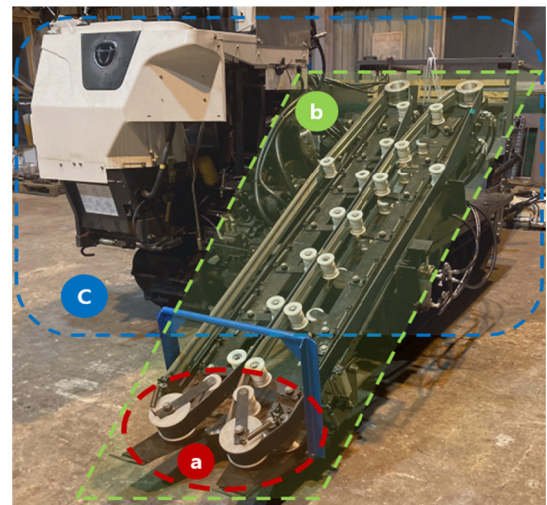


그림 3. 자세 제어 시스템 적용 배추 수확기;

(a) 절단 칼날 및 가이드, (b) 예취부, (c) 플랫폼.

Fig. 3. Cabbage Harvester with Attitude Control System;

(a) Cutting Blade and Guide, (b) Cutting Device, (c) Platform.

2. 예취부 자세제어 메커니즘

배추 수확기 예취부의 자세를 제어 가능한 실제 수확기의 형태는 그림 3과 같고, 메커니즘 설명을 위해 그림 4와 같이 3D 도면으로 쉽게 표현하였다. 자세제어 시스템을 적용한 배추 수확기 예취부의 메커니즘은 배추 노지의 경사에 대응하기 위해서 실린더 3개를 이용해 3개의 축을 제어하여 예취부 단독으로 동작할 수 있도록 구성되어 있다. roll(ϕ)과 slide(x) 축은 첫 번째 실린더(그림 4(a), ① 실린더) 동작으로 roll을 제어하고, 두 번째 실린더(그림 4(a), ② 실린더) 동작으로 slide 축을 제어하여 예취부 높이를 조절하게 된다. 그리고 세 번째 실린더(그림 3(b), ③ 실린더) 동작으로 pitch(θ)를 제어하게 되는 메커니즘으로 구성되어 있다. 측정된 노지 각도에 대응하여 roll 제어를 통해 수평을 유지시키고, pitch 제어를 통해 예취부를 항상 경험적·실험적으로 정해지는 최적 절단각을 유지하게 한다. 또, slide를 통해 노지와 예취부 절단날 사이 높이를 일정하게 유지하여 부정확한 배추 절단을 방지하여 품질을 높이고 정확도를 높게 된다.

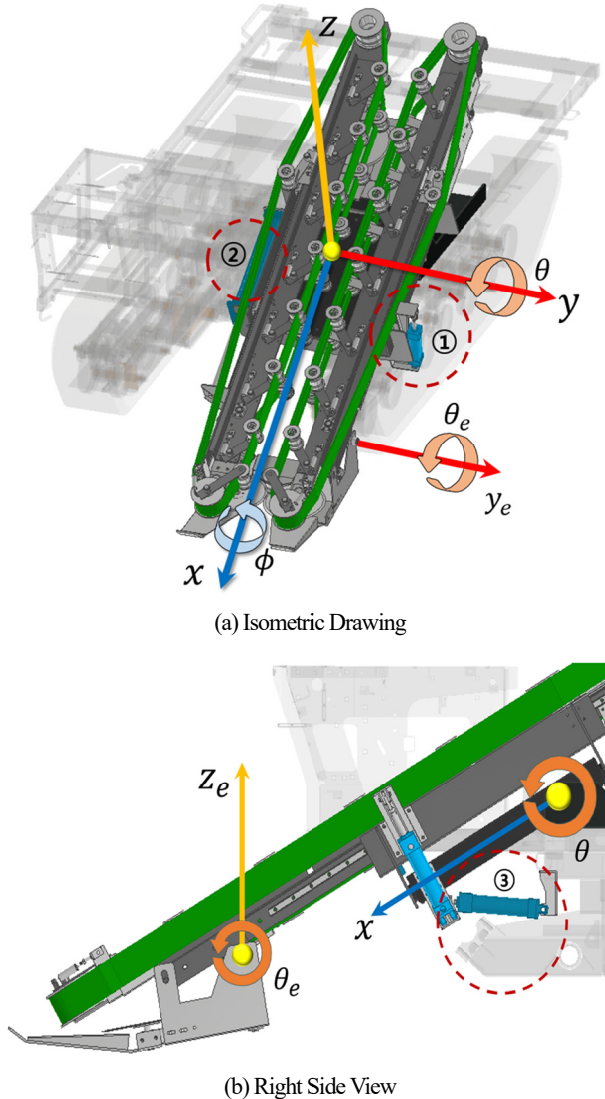


그림 4. 예취부 자세제어 메커니즘.

Fig. 4. Attitude Control Mechanism.

III. 센서 융합 기반 자세 제어 알고리즘

1. 농업 칼만 필터 적용사례

칼만 필터는 이전 데이터와 새로운 데이터에 포함된 노이즈를 제거하고 최적의 데이터 값을 추정하는 알고리즘이다. 자연의 대부분은 비선형적 움직임을 보이나, 선형으로 단순화시켜 적용 가능하여 통계학, 신호처리 뿐만 아니라 제어 분야에도 사용되고 있다. 또한 단일 센서의 단점을 보완하기 위해 다수의 센서를 융합하여 정확한 데이터를 추정하는데 용이하다. 농업에 적용사례는 과수나 작물사이에서 무인 농업용 차량의 위치추정[11-13], 드론의 자세 제어를 위한 측정 시스템[14,15], 로봇의 작업 성능을 향상하기 위해 칼만필터를 이용한 연구가 진행되었다[16]. 그러나 수확기의 자세가 작물 품질을 결정하는 수확과정에 대한 연구는 부족하다. 본 논문에서 제시한 예취부 3축 자세 제어 메커니즘은 국내외로 적용된 사례가 없으며, 기초연구를 위해 농업분야에 한정적으로 연구 진행되었던 칼만 필터로 센서융합을 진행하였다.

2. 센서 융합 기반 자세 제어 알고리즘

예취부 자세를 제어하는 알고리즘을 그림 5와 같이 설계하였다. 자이로 센서에서 각속도 ω , 가속도계에서 가속도 α , 로터리 엔코더의 펄스 E_{pul} 를 칼만 필터로 융합하여 출력된 회전 행렬의 ϕ, θ 를 그림 4의 각 축 실린더 길이와 보정한 데이터로 실린더를 제어해 예취부의 수평을 유지하고, θ_e 를 높이 방향 Z_e 과 보정하여 필요 높이를 유지할 수 있도록 slide(x)축 실린더를 제어하게 된다. 그리고 자세 제어의 안정성을 높이기 위해 실린더 제어 이전 PID 제어를 추가하여 수확과정에서 나타날 수 있는 급격한 경사 변화와 오버슈트에 대응하고자 하였다.

3. 센서 융합을 위한 시스템 모델링

칼만 필터의 알고리즘은 다음 논문을 참조하였고[17,18] 실제값까지 도달하는 시간이 느리나 정지 상태에서 정확히 영점에 돌아오는 가속도 센서의 데이터를 오차 누적이 심하나 패턴을 읽는데 강한 자이로 센서 데이터로 보정하도록 설계하였다.

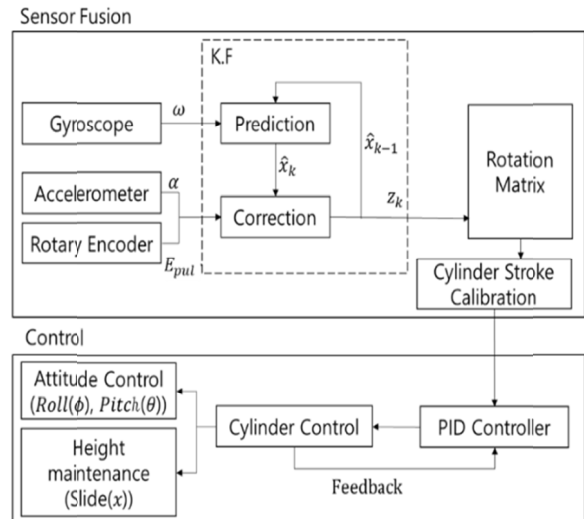


그림 5. 센서 융합 기반 자세 제어 알고리즘.

Fig. 5. Sensor Fusion-based Attitude Control Algorithm.

시스템 모델을 설계하기 위한 시스템 변수 A, H, Q, R 는 다음과 같이 구하였다. 먼저 오일러 각 ϕ, θ, ψ 에 로터리 엔코더 각 θ_e 를 포함한 상태변수 $x = [\phi, \theta, \psi, \theta_e]$ 와 상태 방정식 식 (1)을 통해 시스템 모델 행렬 A 와 시스템 노이즈 Q 를 유도하였다.

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k \quad (1)$$

자이로 센서의 각속도를 오일러 각 ϕ, θ, ψ 으로 추출하기 위해 쿼터니언(quaternion)을 사용한다. 쿼터니언은 $q = [w, v]$ 과 같이 나타내고 여기서 w 는 스칼라, v 는 $[x, y, z]$ 3차원 벡터 성분이다. 쿼터니언 q 는 식 (2)와 같다[19,20].

$$q = w + x_i + y_j + z_k = [q_1, q_2, q_3, q_4] \quad (2)$$

식 (3)은 자이로 센서의 각속도 성분 p, q, r 과 쿼터니언의 관계식이고 쿼터니언으로 변경한 상태변수는 $x_q = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$ 로 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

유도한 쿼터니언의 관계식을 식 (1)과 같이 유도하기 위해 이산 시스템으로 변경하고 로터리 엔코더 θ_e 를 대입하면 식 (4)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} [q_1, q_2, q_3, q_4, \theta_e]_{k+1}^T = & \\ \begin{bmatrix} 1 & -\frac{p \cdot \Delta t}{2} & -\frac{q \cdot \Delta t}{2} & -\frac{r \cdot \Delta t}{2} & 0 \\ \frac{p \cdot \Delta t}{2} & 1 & \frac{r \cdot \Delta t}{2} & -\frac{q \cdot \Delta t}{2} & 0 \\ \frac{q \cdot \Delta t}{2} & -\frac{r \cdot \Delta t}{2} & 1 & -\frac{p \cdot \Delta t}{2} & 0 \\ \frac{r \cdot \Delta t}{2} & \frac{q \cdot \Delta t}{2} & -\frac{p \cdot \Delta t}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ \theta_e \end{pmatrix}_k \end{aligned} \quad (4)$$

시스템 모델 행렬 Q 는 식 (5)와 같으며 Δt 는 샘플링 시간이다. 그리고 시스템 노이즈 Q 는 식 (1)의 w_k 에 공분산 행렬이므로 식 (6)과 같이 나타내며 로터리 엔코더의 Q 는 별개로 조정 가능하도록 자이로 센서 가속도계의 Q 는 Q_i , 로터리 엔코더의 Q 는 Q_e 로 표현하였다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{p \cdot \Delta t}{2} & -\frac{q \cdot \Delta t}{2} & -\frac{r \cdot \Delta t}{2} & 0 \\ \frac{p \cdot \Delta t}{2} & 1 & \frac{r \cdot \Delta t}{2} & -\frac{q \cdot \Delta t}{2} & 0 \\ \frac{q \cdot \Delta t}{2} & -\frac{r \cdot \Delta t}{2} & 1 & -\frac{p \cdot \Delta t}{2} & 0 \\ \frac{r \cdot \Delta t}{2} & \frac{q \cdot \Delta t}{2} & -\frac{p \cdot \Delta t}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q_i \times I_{4 \times 4} & 0_{4 \times 1} \\ 0_{1 \times 4} & Q_e \end{bmatrix} \quad (6)$$

로터리 엔코더 θ_e 는 개별 축으로 따로 운용되기 때문에 별개로 설계 대입하고 식 (7)과 같이 저주파 통과 필터 형태로 칼만 필터에 대입하여 사용하였다.

$$\begin{aligned} \bar{x}_k &= \alpha \bar{x}_{k-1} + (1 - \alpha)x_k \\ \hat{x}_k &= (I - K_k)\hat{x}_k + K_k z_k \end{aligned} \quad (7)$$

$\bar{x}_k$ 는 저주파 통과 필터 예측 값이고, $\hat{x}_k$ 는 칼만 필터 추정 값 수식이다. $\bar{x}_k$ 가중치 α 에 칼만 이득 $1 - K$ 를 대입하면 다음 식 (8)과 같다.

$$\hat{x}_k = (1 - K)\bar{x}_{k-1} + Kx_k \quad (8)$$

칼만 필터 추정값 수식과 유사한 형태이며 가중치를 고정하여 추측하는 저주파 통과 필터와 다르게 칼만 필터 형태로 가중치를 조정하도록 결합하였다. 그리고 칼만 필터 예측 과정에 이용되는 자이로 센서 데이터를 쿼터니언으로 변경하였기 때문에 식 (9)와 같이 측정값 z_k 로 사용되는 가속도 데이터 또한 쿼터니언으로 변경하였고, 측정 관계식인 식 (10)으로 측정값과 상태 변수의 관계인 시스템 행렬 H 를 구하였다.

$$z_k = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} - \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \\ -\frac{E_{pul} \cdot 360}{E_{re}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} z_k &= Hx_k + v_k \\ H &= I_{5 \times 5} \end{aligned} \quad (10)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_i \times I_{4 \times 4} & 0_{4 \times 1} \\ 0_{1 \times 4} & R_e \end{bmatrix} \quad (11)$$

E_{pul} 는 로터리 엔코더 펄스 데이터, E_{re} 은 엔코더의 분해능이며 로터리 엔코더 각 θ_e 으로 변경할 수 있도록 하였다. 측정 노이즈 R 은 v_k 의 공분산 행렬이므로 Q 식과 유사하며 식 (11)과 같다. 유도한 시스템 모델 A, H, Q, R 을 칼만 필터 알고리즘[10]에 대입하여 센서 융합을 진행하고, 출력된 데이터는 $q = [q_1, q_2, q_3, q_4]$ 와 같이 쿼터니언으로 출력 받으므로 식 (12)을 이용해 오일러 각도로 변환하여 ϕ, θ, ψ 을 구하게 된다. θ_e 은 이미 각도 형태이므로 그대로 두어 회전 행렬은 $[\phi, \theta, \psi, \theta_e]$ 이 된다.

$$\begin{aligned} \phi &= \text{atan2}(2(q_2q_3 + q_0q_1, q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2)) \\ \theta &= \text{sin}^{-1}(2(q_0q_2 - q_1q_3)) \\ \psi &= \text{atan2}(2(q_1q_2 + q_0q_3, q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)) \end{aligned} \quad (12)$$

4. 시스템 모델 Q, R 조정

시스템 모델 오차 공분산 행렬 Q 와 R 은 실험을 통해 선정하며, 식 (13)과 같이 칼만 필터 오차 공분산 과정 P_k 과 칼만 이득 K_k 계산과정에서 Q, R 을 사용하므로 칼만 이득 K_k 의 크기를 결정하며 칼만 이득이 커지면 측정값 z_k 를, 작아지면 예측값 $\hat{x}_k$ 의 데이터를 더 많이 반영한다.

$$\begin{aligned} P_{k+1} &= AP_kA^T + Q \\ K_k &= \frac{P_kH^T}{HP_kH^T + R} \end{aligned} \quad (13)$$

사용 환경에 따라 적절히 변경하여 조정할 수 있으며 조정을 위해 MCU(Arduino MEGA 2560)와 가속도 센서, 자이로 센서가 내장된 관성측정장치 IMU센서(Inertial measurement

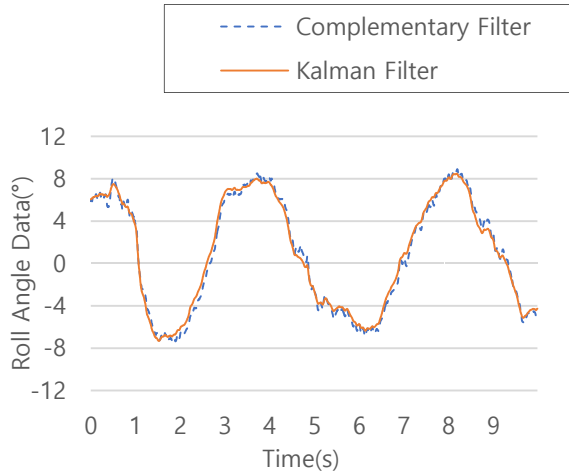


그림 6. 상보필터와 칼만필터 비교.

Fig. 6. Complementary Filter and Kalman Filter.

unit. MPU-6050)사용하였다. PC 직렬통신방식으로, 인터페이스 속도는 100 kbps, 가속도센서와 자이로 센서 주기는 1 kHz로 실험을 진행하였다. 식 (14)과 같이 저주파 통과 필터와 고주파 통과 필터를 결합한 필터 형태인 상보 필터와 비교하여 조정하였다. Q 와 R 은 식 (15)와 같이 선정하였으며 그림 6과 같이 상보 필터의 데이터와 유사한 결과를 보인다.

$$Ang_{cur} = \alpha * (Ang_{pre} + Gyro * dt) + (1 - \alpha) * (Acc) \quad (14)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0.001 \times I_{4 \times 4} & 0_{4 \times 1} \\ 0_{1 \times 4} & 0 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0.03 \times I_{4 \times 4} & 0_{4 \times 1} \\ 0_{1 \times 4} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

5. PID 제어 시스템

평탄하지 않고 고르지 못한 곳을 주행하는 경우가 많은 농기계의 자세 안정화와 응답성을 높이고 급격한 경사 변화나 장애물에 대응할 수 있도록 PID 제어 시스템을 알고리즘에 통합하였다. 그림 7과 같이 측정된 각도 데이터를 실린더 스트로크로 보정한 데이터를 입력시켜 비례항을 통해 제어 값과 위치 값의 차에 비례한 크기가 되도록 하고, 적분 과정을 통해 일정한 상태를 유지하고 있는 오차를 제거하며, 미분 과정을 통해 급격한 위치 변화와 반동으로 인해 제어 값을 넘는 오버슈트를 PID 제어로 보정하여 안정화를 진행하게 된다.

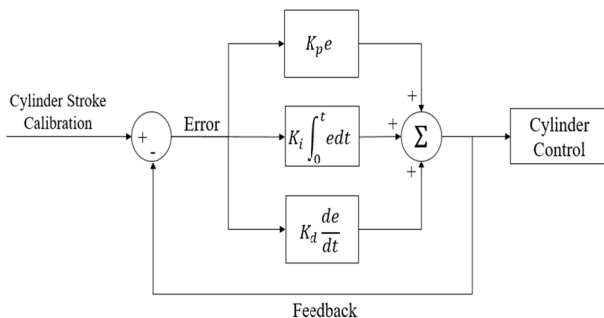


그림 7. PID 제어 알고리즘.

Fig. 7. PID Control Algorithm.

IV. 실험 시스템 구성 및 결과

1. 메커니즘 기반 축소 모델 제작

그림 3의 실제 배추 수확기 예취부 메커니즘을 기반으로 2:1 축소된 모델을 통해 제한한 자세 제어 알고리즘을 검증하였다. 축소 모델은 실제 자세제어 시스템에 3축을 제어하는 유압 실린더를 대신하여 리니어 액추에이터 3개를 사용하였다. 이 축소 모델을 주행 플랫폼인 Husky(Clearpath Inc. Husky)에 IMU 센서, 로터리 엔코더(Dream Solution. ENAB512-C) 등과 함께 그림 8과 같이 부착하고 MCU에 그림 5의 센서 융합 부분을 구현하였다.

제어 부분은 센서 융합을 통해 출력한 회전행렬을 이용하여 roll, pitch 축은 각각 0도, 30도를 유지하도록 리니어 액추에이터를 제어하였다. 또, slide 축은 식 (16)과 같이 로터리 엔코더 각 θ_e 을 높이 Z_e 데이터로 보정하여 항상 제어목표를 유지할 수 있도록 리니어 액추에이터를 제어하였다.

$$Z_e = -2.129 * \theta_e + 154.33 \quad (16)$$

2. 실험 시스템 구성

자세제어 시스템의 성능을 정량적으로 평가하기 위해 식 (17)으로 정의되는 평균 제곱근 오차 RMSE(Root Mean Square Error)를 계산하여 비교하였다[22].

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Reference_i - Actual_i)^2}{n}} \quad (17)$$

식 (17)에서 $Actual_i$ 는 다음 시스템으로 측정되었다. 실험 시스템은 그림 9와 같이 모션 캡처 카메라(Opti-Track Inc.) 8대를 이용하여 구성하였고, 그림 10과 같이 자세제어 시스템 예취부 축소 모델의 자세를 확인하기 위해 축소 모델에 마커 4개 (즉, $Actual_i$ 로 사용), 주행 플랫폼 Husky의 자세를 측정하기 위해 Husky에 마커 4개 (즉, $Reference_i$ 로 사용)를 부착하였다. 그리고 각각의 마커를 4개씩 강체로 구속하여 자세제어기와 Husky 구분하였고, 그림 11과 같이 장애물을 구성하여 1분간 직진 주행하였다. 데이터는 120 Hz로 측정하였다. 그림 10의 Marker 1은 예취부 높이 제어 성능을 검증하는데 사용하였다.

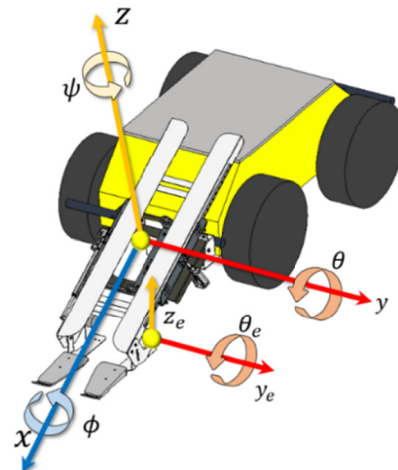


그림 8. 예취부 2:1 축소 모델.

Fig. 8. Half Scaled Cutting Device Model.

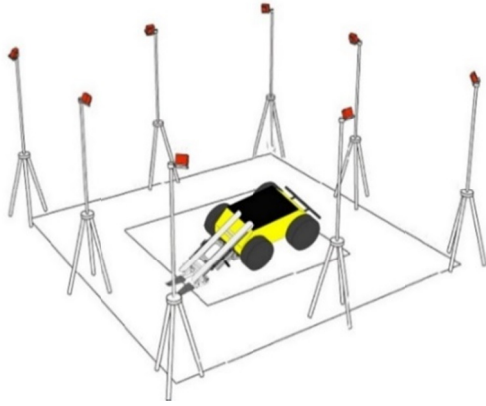


그림 9. 모션 캡처 장비 실험 환경.

Fig. 9. Motion Capture Equipment Experimental Environment.

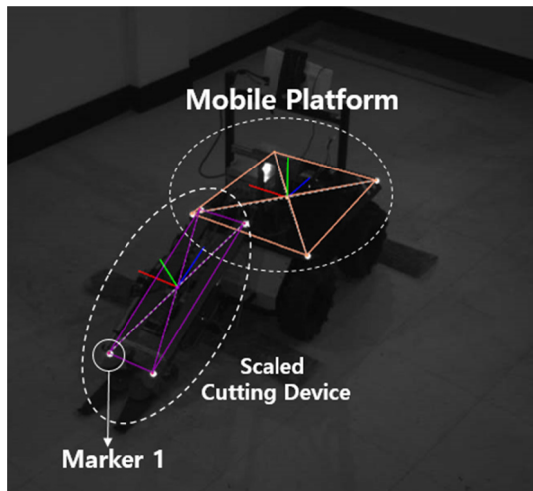


그림 10. 모션 캡처를 위한 마커 부착 위치 및 강체 구속.

Fig. 10. Marker Point Attachment Position and Rigid Body Constraint for Motion Capture.



그림 11. 자세 제어 시스템 실험 환경

Fig. 11. Experimental Setup for Attitude Control System.

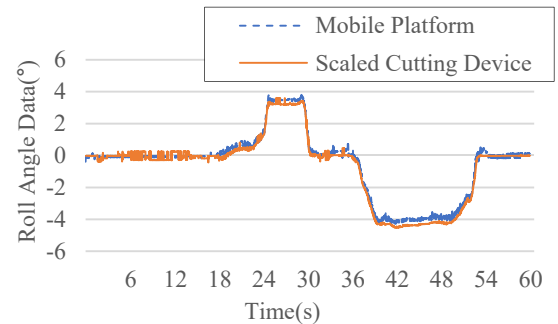
3. 자세제어 시스템 유무 실험 결과

실험 결과 그림 12(a)와 같이 자세제어 시스템을 사용하지 않았을 때 예취부 축소 모델과 주행 플랫폼의 실험 결과는 유사한 그래프를 볼 수 있으나, 자세 제어 시스템을 사용하면 그림 12(b)와 같이 수평 0도를 유지하려는 것을 그래프에서 볼 수 있다. 비교를 위해 0도를 $Reference_i$ 로, 모션 캡처 카메라에서 측정된 각도 데이터를 $Actual_i$ 로 RMSE 식에 대입하여 계산하면 사용하지 않았을 때 2.15도, 사용하였을 때는 0.89도로 약 58% 정도 수평 유지를 위한 자세 개선이 되었다.

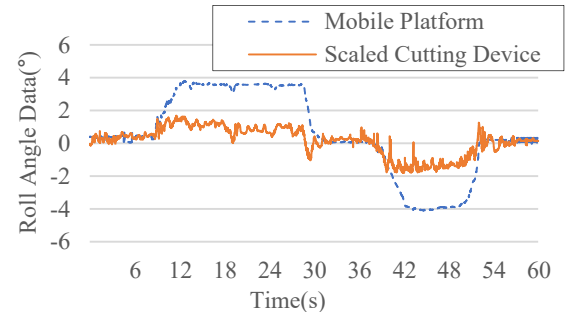
표 1. 자세제어 시스템 유무에 따른 RMSE.

Table 1. RMSE of Level / Height with / without Attitude Control.

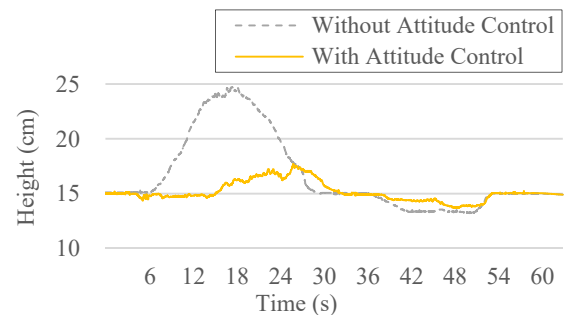
	Level Maintenance(°)		Height Maintenance(cm)	
	without	with	without	with
RMSE	2.15	0.89	4.05	2.23



(a) Without Attitude Control



(b) With Attitude Control



(c) Height Control

그림 12. 자세제어 시스템 유무에 따른 예취부 자세 비교.

Fig. 12. Comparison of Cutting Device Attitude with/without Attitude Control System.

높이 유지는 여기서 Z_e 의 제어 목표를 15 cm로 설정하고, 그림 10의 Marker 1와 지면 사이의 길이 데이터를 예취부 높이 데이터로 측정하였다. 실험결과는 그림 12(c)와 같다. 여기서 30초 이후의 두 값이 크게 차이가 없는 현상은 앞 바퀴가 장애물을 밟았을 때 예취부 전방 가이드 높이 변화량이 뒷바퀴가 장애물을 밟았을 때 높이 변화량보다 높기 때문에 발생했다. 그러나, 두 값을 비교하면 자세 제어 시스템을 사용한 결과가 제어 목표 15 cm에 더 근접한 것을 볼 수 있다.

제어 목표 15 cm를 $Reference_i$, 예취부 높이를 $Actual_i$ 으로 RMSE를 계산하였다. 자세 제어 알고리즘을 사용하지 않았을 때 RMSE 4.05 cm, 사용하였을 때 RMSE 2.23 cm으로 약 45% 정도 높이 유지를 위한 자세 개선이 되었다.

V. 결론

본 연구는 기존 배추 수확기의 인발, 절단 과정의 성공률을 높이기 위해 칼만 필터로 가속도계와 자이로 센서, 로터리 엔코더를 센서 융합하여 PID 제어 알고리즘으로 자세를 제어하였다. 그리고 알고리즘 성능을 검증하기 위해 예취부를 2:1 축소한 모델을 제작하고 주행 플랫폼 Husky에 설치하여 배추 수확기 예취부 자세 제어 메커니즘을 동일하게 적용하였다. 실험결과는 제안한 자세 제어 알고리즘을 적용하였을 때 수평 유지는 약 58%, 높이 유지는 약 45% 정도의 자세 개선을 확인하였다. 그리고 이 개선 성능은 각도 변화와 높이 변화가 본 논문의 실험 환경보다 장애물, 두둑 등의 높이 변화가 크다면 더욱 좋은 개선 결과를 보일 것으로 기대된다. 추후 유압 시스템으로 구동 되는 실제 배추 수확기 예취부 자세 제어 시스템에 제안한 알고리즘을 적용하여 배추밭 등에서 필드 테스트할 예정이다.

REFERENCES

- [1] K. S. Song, D. Y. Choi, and H. Hwang, "Development of semi-automatic cabbage piling system for tractor implemented chinese cabbage harvester," *Korea Society for Agricultural Machinery (KSAM)*, vol. 27, no. 3, pp. 211-218, Jun. 2002.
- [2] J. T. Hong, J. H. Sung, H. J. Jun, Y. K. Kim, and K. M. Lee, "Development of Chinese Cabbage Harvester(I) -A fundamental study for developing a Chinese Cabbage Harvester," *Korea Society for Agricultural Machinery (KSAM), Journal of the Summer Conference*, pp. 59-66, Jul. 2000.
- [3] M. Chowdhury, Y. S. Lee, B. E. Jang, Y. J. Kim, and S. O. Chung, "Basic tests of Chinese cabbage yield monitoring sensors for small-sized cabbage harvesters," *Precision Agriculture Science and Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 107-118, Jun. 2020.
- [4] G. U. Jung and J. H. Ryu, "Outdoor localization for a quad-rotor using extended Kalman filter and path planning," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 20, no. 11, pp. 1175-1180, Nov 2014.
- [5] G. U. Jung and J. H. Ryu, "Fusion of a particle filter and an extended Kalman filter for real-time high-precision localization of autonomous vehicles," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems(in Korean)*, vol. 25, no. 6, pp. 526-533, Jun. 2019.
- [6] Y. J. Wang, Z. Li, and X. Li, "External disturbances rejection for vector field sensors in attitude and heading reference systems," *Micromachines 2020, MDPI*, vol. 11, no. 9, 803 Aug. 2020.
- [7] T. H. Fang, J. Y. Oh, S. K. Park, B. J. Park, and D. J. Cho, "Enhanced attitude determination with IMU using estimation of lever arms," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems(in Korean)*, vol. 19, no. 10, pp. 941-946, Oct. 2013.
- [8] A. R. J. Ruiz, F. S. Granja, J. C. P. Honorato, and J. I. G. Rosas, "Accurate pedestrian indoor navigation by tightly coupling foot-mounted IMU and RFID measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 1, pp. 178-189, Jan. 2012.
- [9] J. Jin and J. Jo, "Triple inertial sensor redundancy for the attitude control of a small multi-copter-type drone and flight tests using pixhawk," *Journal of institute of control robotics and systems (in Korean)*, vol. 25, no. 5, pp 452-462, May. 2019.
- [10] I. Y. Yun, J. Y. Shim, and J. K. Kim, "Localization of outdoor wheeled mobile robots using indirect Kalman filter based sensor fusion," *Journal of institute of control robotics and systems (in Korean)*, vol. 14, no. 8, pp 800-808, Aug. 2008.
- [11] S. C. Kim, S. I. Cho, S. G. Lee, W. Y. Lee, Y. G. Hong, G. H. Kim, H. J. Cho, and G. W. Gang, "Precise positioning of farm vehicle using plural GPS receivers - error estimation simulation and positioning fixed point -," *Journal of biosystems engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 116-121, Jul. 2011.
- [12] K. M. Noh, J. G. Park, and Y. C. Chang, "Study on INS/GPS sensor fusion for agricultural vehicle navigation system," *Journal of biosystems engineering*, vol. 33, no. 6, pp. 423-429, Dec. 2008.
- [13] P. Blok, H. K. Suh, K. Boheemen, H. J. Kim, and G. H. Kim, "Autonomous in-row navigation of an orchard robot with a 2D LIDAR scanner and particle filter with a laser-beam model," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 24, no. 8, pp. 726-735, Aug. 2018.
- [14] Z. Tiemin and L. Yihua, "Attitude measure system based on extended Kalman filter for multi-rotors" *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 134, pp. 19-26, Mar. 2017.
- [15] Y. Cho, "A Triple Nested PID Controller based on sensor fusion for quadrotor attitude stabilization," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 67, no. 7, pp. 871-877, Jul. 2018.
- [16] H. Song, K. M. Yang, J. S. Oh, S. H. Song, J. B. Han, and K. H. Seo, "Study on the model based control considering rotary tillage of autonomous driving agricultural robot," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 15, no. 3, pp. 233-239, Feb 2020.
- [17] J. Vaganay, M. J. Aldon, and A. Fourier, "Mobile robot attitude estimation by fusion of inertial data," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, DOI: 10.1109/ROBOT.1993.291995, May 1993.
- [18] C. Kim, I. Lee, J. Oh, H. Yu, and H. Park, "Performance analysis of positioning method using inertial navigation system and self-alignment based on Kalman filter using that positioning information," *Journal of institute of control robotics and systems (in Korean)*, vol. 26, no. 8, pp 604-615, Aug. 2020.
- [19] D. Gebre-Egziabher, R. C. Hayward, and J. D. Powell, "Design of multi-sensor attitude determination systems," *IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems*, vol. 40, no. 2, pp. 627-649, Jul. 2004.

- [20] C. K. Jack, "Quaternion Kinematic and dynamic differential equations," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 1, pp. 53-64, Feb. 1992.
- [21] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li, "PID control system analysis, design, and Technology," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 4, pp.559-576, Jul. 2005.
- [22] Y. W. Choe, "Error measures for normal random variables," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-14, no. 1, 64-68, Jan 1978.



박 용 현

2019년 경상대학교 생물산업기계공학과 졸업. 2019년~현재 경상대학교 대학원 바이오시스템공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 수확 로봇, 자율주행, 자동 제어 시스템.



전 종 표

2008년 순천대학교 기계공학과(공학사) 졸업. 2015년 전남대학교 기계공학과(공학석사) 졸업. 2020년~현재 전남대학교 지역·바이오시스템공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 mechanical engineering, design and harvesting robot.

손 형 일

제어·로봇·시스템학회 논문지, 제26권 제1호 참조.